

# Základy světelné techniky (5)

## Základy nauky o barvě (2. část)

prof. Ing. Jiří Habel, DrSc., Elektrotechnická fakulta ČVUT V Praze

V mezinárodní kolorimetrické soustavě (XYZ) se volí měrná světla fyzikálně nerealizovatelná. Je tomu tak proto, že v takovém případě jsou trichromatické složky, a tedy i souřadnice všech reálných barev, kladné. Hodnoty kolorimetrických koeficientů (tab. 5.3) se považují za základní čísla definující soustavu XYZ, platí pro normálního fotometrického pozorovatele a používají se při pozorování v zorném úhlu do 4° [5.1].

Při pozorování v úhlu větším než 4° (tyto poměry převažují při pozorování povrchových barev) se však při výpočtech používají kolorimetrické koeficienty  $x_{10}(\lambda)$ ,  $y_{10}(\lambda)$ ,  $z_{10}(\lambda)$ , tzn. doplňkové kolorimetrické pozorovatele. Měrná světla soustavy XYZ byla stanovena tak, aby hodnoty kolorimetrického koeficientu  $y_{10}(\lambda)$  byly shodné s hodnotami poměrné spektrální citlivosti  $V(\lambda)$  normálního fotometrického pozorovatele. Proto je v soustavě XYZ trichromatická složka  $Y$  úměrná světelnému toku, popř. jasů barevného podnětu. Například jas daného barevného podnětu se vypočítá ze vztahu

$$L = 683Y \text{ (cd}\cdot\text{m}^{-2}) \quad (5.6)$$

kde  $Y$  je trichromatická složka určená z rovnice (5.3).

V kolorimetrickém prostoru XYZ i v jeho rovinném řezu (tj. v kolorimetrickém trojúhelníku  $xy$ ) neodpovídají v různých místech stejné lineární vzdálenosti stejným subjektivně vnímaným rozdílům vjemu barvy. Tam, kde je třeba rozdíly chromatičnosti světél či kolority předmětů popsat charakteristikami odpovídajícími subjektivnímu vjemu, používají se tzv. *rovnoměrné kolorimetrické prostory* či diagramy. Od roku 1976 jsou mezinárodně normalizovány dvě takové soustavy. Jednak soustava  $L^* u^* v^*$  (zkráceně označovaná CIE LUV), jednak soustava  $L^* a^* b^*$  (zkráceně označovaná CIE LAB). Číselné hodnoty těchto soustav jsou jen přibližně srovnatelné, ale nejsou vzájemně převoditelné. V oboru světelných zdrojů a barevných signálů, ve fotografii, v televizní a polygrafické reprodukci barev se všeobecně používá soustava CIE LUV, zatímco při hodnocení textilních materiálů připadá v úvahu pouze soustava CIE LAB.

V soustavě CIE LUV jsou kolorimetrické souřadnice obecně označeny písmem-

ny  $u^* v^*$ . Pro případ konstantní veličiny  $L^*$  (tzn. pro barvy se stejnou subjektivní světlostí) má soustava CIE LUV přibližně rovnoměrný kolorimetrický trojúhelník (diagram chromatičnosti) v souřadnicích označených  $u', v'$ , který je projekční transformací známého trojúhelníku v souřadnicích  $x, y$  (soustava CIE 1931). Trojúhelník  $u', v'$  se běžně používá pro znázornění barev v rovině.

V pravoúhlém rovnoměrném prostoru  $L^* u^* v^*$  platí vztahy

$$\begin{aligned} L^* &= 116 (Y/Y_n)^{1/3} - 16 \\ &\text{pro } (Y/Y_n) > 0,008 856 \\ L^* &= 903,3 (Y/Y_n) \\ &\text{pro } (Y/Y_n) \leq 0,008 856 \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} u^* &= 13 L^* (u' - u'_n) \\ v^* &= 13 L^* (v' - v'_n) \end{aligned}$$

Přítom trichromatické souřadnice  $u', v', u'_n, v'_n$  použitého normalizovaného světla se stanovují z výrazů

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \quad (5.8)$$

$$u'_n = \frac{4X_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n}$$

$$v'_n = \frac{9Y_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n} \quad (5.9)$$

kde jsou

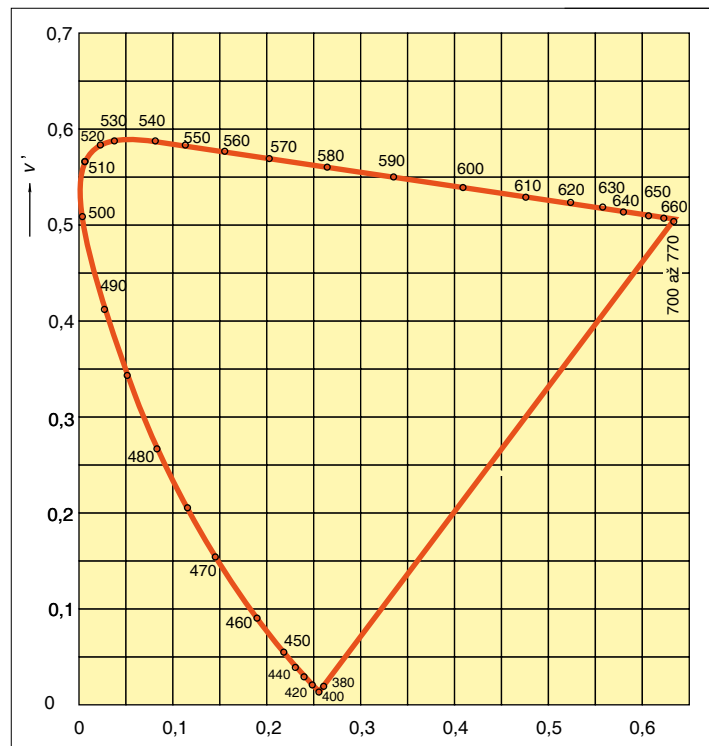
$X, Y, Z$  trichromatické složky popisovaného barevného podnětu v soustavě XYZ,

$X_n, Y_n, Z_n$  trichromatické složky pro výpočet použitého normalizovaného světla upravené tak, aby pro dokonalý rozptylovač platilo  $Y_n = 100$ .

Tabulky kolorimetrických koeficientů pro různá normalizovaná světla lze nalézt v normě ČSN 01 1718 Měření barev.

Vzdálenost  $\Delta E^*_{uv}$  dvou bodů barev navzájem vzdálených o úseky  $\Delta L^*, \Delta u^*, \Delta v^*$  ve směru jednotlivých souřadnicových os se vypočítá ze vztahu

$$\Delta E^*_{uv} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2} \quad (5.10)$$



Obr. 5.7. Rovnoměrný kolorimetrický trojúhelník (diagram chromatičnosti) v souřadnicích  $u', v'$  v soustavě CIE LUV (z roku 1976)

Tab. 5.3. Hodnoty kolorimetrických koeficientů normálního kolorimetrického pozorovatele v trichromatické soustavě XYZ (podle ČSN 01 1718)

$\lambda$	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
380	0,001	0,000	0,007
390	0,004	0,000	0,020
400	0,014	0,000	0,068
410	0,044	0,001	0,207
420	0,134	0,004	0,646
430	0,284	0,012	1,386
440	0,348	0,023	1,747
450	0,336	0,038	1,772
460	0,291	0,060	1,669
470	0,195	0,091	1,288
480	0,096	0,139	0,813
490	0,032	0,208	0,465
500	0,005	0,323	0,272
510	0,009	0,503	0,158
520	0,063	0,710	0,078
530	0,166	0,862	0,042
540	0,290	0,954	0,020
550	0,433	0,995	0,009
560	0,595	0,995	0,004
570	0,762	0,952	0,002
580	0,916	0,870	0,002
590	1,026	0,757	0,001
600	1,062	0,631	0,001
610	1,003	0,503	0,000
620	0,854	0,381	0,000
630	0,642	0,265	0,000
640	0,448	0,175	0,000
650	0,284	0,107	0,000
660	0,165	0,061	0,000
670	0,087	0,032	0,000
680	0,047	0,017	0,000
690	0,023	0,008	0,000
700	0,011	0,004	0,000
710	0,006	0,002	0,000
720	0,003	0,001	0,000
730	0,001	0,001	0,000
740	0,001	0,000	0,000
750	0,000	0,000	0,000
760	0,000	0,000	0,000
770	0,000	0,000	0,000

Rovnice (5.10) dobře vystihuje subjektivní rozdíl barvy dvou ploch stejné velikosti a tvaru, které na bílém či světlešedém podkladu rozlišuje pozorovatel fotopicky adaptovaný na osvětlení, jehož spektrální složení je málo odlišné od spektrálního složení použitého normalizovaného světla. Pro konstantní jas  $L^*$  se dostane přibližně rovnoměrný kolorimetrický trojúhelník (diagram chromatičnosti)  $u', v'$ , (obr. 5.7). Souřadnice  $u', v'$ , se zjistí ze vztahů (5.8), resp. při použití souřadnic  $x, y, z$  výrazů

$$u' = \frac{4x}{-2x+12y+3}$$

$$v' = \frac{9y}{-2x+12y+3} \quad (5.11)$$

Avšak přímý výpočet souřadnic  $u', v'$ , z trichromatických složek podle rovnice (5.8) je méně zatížen chybou ze zaokrouhlování při přepočtu trichromatických složek na trichromatické souřadnice.

Od dřívější normalizované soustavy CIEuv z roku 1960, popř. CIE-UVW z roku 1964 (souřadnice  $u, v$ ), se soustava CIE-LUV (z roku 1976 se souřadnicemi označenými  $u^*, v^*$ , nebo, pro konstantní jas  $L^*$  značenými  $u', v'$ ) liší pouze velikostí činitele v čitateli vzorců pro výpočet souřadnice  $v$  (číslem 9 namísto původního čísla 6). Vztahy pro výpočet souřadnic  $u$  a  $u'$  jsou stejné. Až do odvolání je zatím povoleno soustavu  $uv$  i nadále používat, zejména s ohledem na plynulou návaznost na dosavadní hodnocení, jako je tomu např. při stanovování indexu podání barev (viz odst. 5.6) pro charakterizování světla vyzařovaného různými primárními světelnými zdroji. Pro porovnání s diagramem chromatičnosti  $u', v'$  nakresleným na obr. 5.7 je na obr. 5.8 znázorněn rovnoměrný kolorimetrický trojúhelník v souřadnicích  $uv$  dřívější soustavy CIE UVW.

Druhá normalizovaná přibližně rovnoměrná soustava CIE (z roku 1976) je  $L^* a^* b^*$ , zkráceně označovaná CIE LAB. V pravouhlém rovnoměrném prostoru  $L^* a^* b^*$  se na osy vynášejí hodnoty veličin  $L^*, a^*, b^*$  určené vztahy

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16$$

$$a^* = 500 \cdot \left[ f \left( \frac{X}{X_n} \right) - f \left( \frac{Y}{Y_n} \right) \right] \quad (5.12)$$

$$b^* = 200 \cdot \left[ f \left( \frac{Y}{Y_n} \right) - f \left( \frac{Z}{Z_n} \right) \right]$$

kde je  $f \left( \frac{X}{X_n} \right) = \left( \frac{X}{X_n} \right)^{1/3}$

pro  $\frac{X}{X_n} > 0,008 856$  (5.12a)

$f \left( \frac{X}{X_n} \right) = 7,787 \cdot \left( \frac{X}{X_n} \right) + \frac{16}{116}$

pro  $\frac{X}{X_n} \leq 0,008 856$  (5.12b)

Pro  $f \left( \frac{Y}{Y_n} \right)$  a pro  $f \left( \frac{Z}{Z_n} \right)$  rovněž platí vztahy (5.12a) a (5.12b),

přičemž se za  $\frac{X}{X_n}$  dosadí  $\frac{Y}{Y_n}$ , popř.  $\frac{Z}{Z_n}$ .

Význam  $X, Y, Z$  a  $X_n, Y_n, Z_n$  je stejný jako v rovnicích (5.7). Vzdálenost  $\Delta E^*_{ab}$  dvou bodů barev vzdálených od sebe ve směru jednotlivých souřadnicových os o  $\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*$  se stanovuje ze vztahu

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (5.13)$$

Rovnice (5.13) platí za obdobných podmínek jako vztah (5.10).

Důležité je poznamenat, že vynese-li se souřadnice  $b^*$  v závislosti na souřadnici  $a^*$  do pravouhlé soustavy souřadnic, neodpovídají takto vzniklé body určité barvě, neboť jejich poloha závisí na velikosti  $L^*$ .

Přímky v diagramu  $x, y$  se pro  $L^* = \text{konst.}$  v diagramu  $a^*, b^*$  obvykle stávají křivkami. V diagramu  $u^*, v^*$ , resp.  $u', v'$ , zůstávají takové přímky přímkami. Toto je podstatné z hlediska aditivního míšení barev.

V soustavě přirozených (Helmholtzových) barevných souřadnic se barva popisuje náhradní  $\lambda_d$  (popř. doplňkovou  $\lambda_c$ ) vlnovou délkou (udávající tón barvy), souřadnicovou či kolorimetrickou čistotou (udávající sytost barvy) a jasem, popř. též činitelem odrazu či prostupu (určujícím světlost barvy).

Náhradní vlnová délka je vlnová délka spektrálního (monochromatického) světla, které smíseno ve vhodném poměru s určitým nepestrým světlem dává světlo stejné chromatičnosti, jako má uvažované světlo. V diagramu chromatičnosti (obr. 5.6) je náhradní vlnová délka  $\lambda_d$  určena průsečíkem čáry spektrálních barev (s vyznačenými vlnovými délkami) a spojnice bodů  $W$  (resp.  $E$ ) smluvního bílého světla a  $F$  dané barvy. Pro purpury není možné náhradní vlnovou délku stanovit, a proto se pro ně udává doplňková vlnová délka. Doplňková vlnová délka  $\lambda_c$  je vlnová délka spektrálního monochromatického světla, které smíseno ve vhodném poměru s daným barevným podnětem vzbudí stejný barevný vjem jako zvolené nepestré světlo.

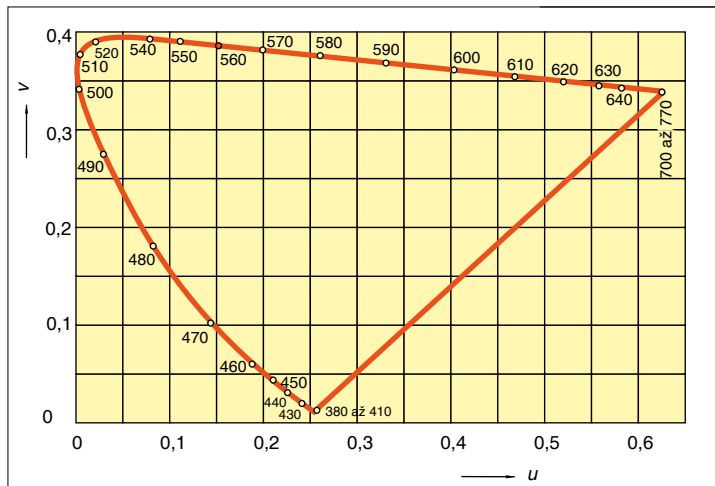
V diagramu chromatičnosti (obr. 5.6) je doplňková vlnová délka  $\lambda_c$  určena průsečíkem čáry spektrálních barev se spojnicí bodů  $K$  dané barvy a  $W$  smluvního bílého světla. Na prodloužené spojnici bodů  $F$  a  $W$  (a to na opačné straně od bodu  $W$ , než je bod  $F$ ) leží tzv. kompenzační barvy. Zvláštním případem kompenzační barvy je komplementární barva (doplňková), která smíšená ve vhodném poměru s danou barvou dává nepestrou (neutrální) barvu (bílou, šedou, černou) (obr. 5.2).

Další veličinou nutnou k popisu barvy v soustavě přirozených souřadnic je vedle náhradní vlnové délky veličina, kterou se fyzikálně ocení sytost barvy. Psychosenzorickému pojmu sytost barvy odpovídá psychofyzikální pojem čistota, a to buď souřadnicová  $p_e$  nebo kolorimetrická  $p_c$ , které jsou definovány vztahy

$$p_e = \frac{y - y_w}{y_d - y_w} = \frac{x - x_w}{x_d - x_w} \quad (5.14)$$

$$p_c = p_e \frac{y_d}{y} \quad (5.15)$$

kde jsou  $x, y$  trichromatické souřadnice měřené barvy,  $x_w, y_w$  trichromatické souřadnice smluvního bílého světla  $W$ ,



Obr. 5.8. Rovnoměrný kolorimetrický trojúhelník v souřadnicích  $u, v$  v dřívější soustavě CIE UVW (z roku 1964)

$x_d, y_d$  trichromatické souřadnice spektrálního světla, jehož vlnová délka  $\lambda_d$  je shodná s náhradní vlnovou délkou světla uvažované barvy (např.  $F$ ), nebo jsou to trichromatické souřadnice průsečíku přímky čistých purpurů s přímkou spojující bod (např.  $K$ , viz obr. 5.6) uvažované barvy s bodem  $W$  smluvního bílého světla.

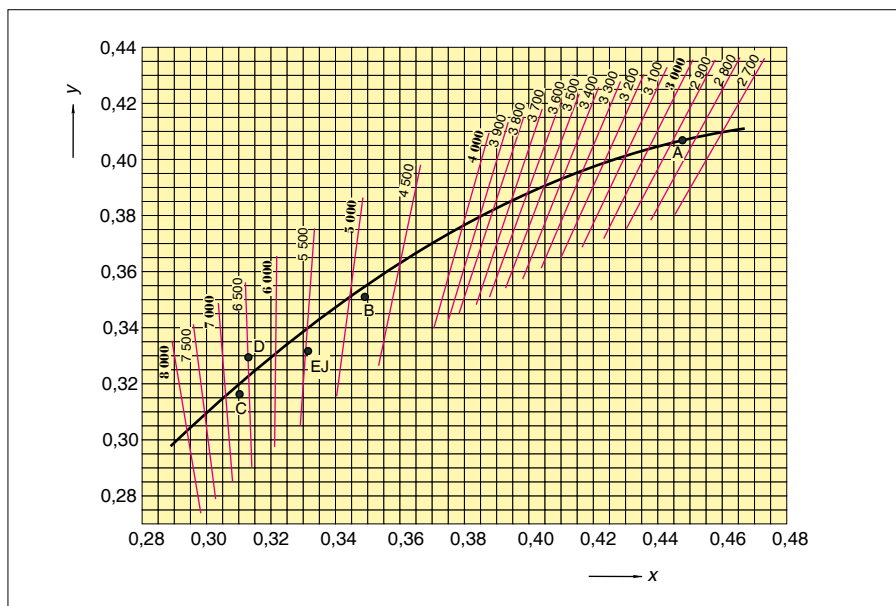
#### 5.4. Teplota chromatičnosti

Nebere-li se v úvahu světelný tok, resp. jas zdroje, lze k popisu barvy či k vystižení barevných vlastností světla vyzařovaného teplotními zdroji využít kromě zmíněných trichromatických souřadnic (např.  $x, y$ ) též teplotu chromatičnosti. Teplota chromatičnosti  $T_c$  je rovna teplotě černého zářiče, jehož záření má tutéž chromatičnost jako uvažované záření. Udává se v kelvinech (K), často se pracuje s převrá-

cenou hodnotou  $T_c$  v kelvinech násobenou  $10^6$ , tj. s veličinou  $(10^6/T_c)$  udávanou v převrácených megakelvinech ( $MK^{-1}$ ).

Čára teplotních zářičů s vyznačenými hodnotami teploty chromatičnosti  $T_c$  je zakreslena v diagramu chromatičnosti na obr. 5.6 a podrobněji na obr. 5.9 (s hodnotami  $T_c$  v kelvinech).

Barvu světla zdrojů, jejichž záření co do spektrálního složení odpovídá teplotnímu zářiči jen přibližně (křivka spektrálního složení je plynulá, bez prudkých změn), lze popsat *ekvivalentní* teplotou chromatičnosti  $T_c$ . Pro zdroje, jejichž křivka spektrálního složení vykazuje prudké změny (výrazná pásma, čáry – výbojové zdroje), je možné k přibližnému popsání barvy využít pojem *náhradní* teplota chromatičnosti  $T_n$ . Náhradní teplota chromatičnosti je definována teplotou chromatičnosti odpovídající bodu, který leží na čáře teplotních zářičů nejbližší bodu, jenž znázorňuje chromatičnost (např. určenou



Obr. 5.9. Čára teplotních zářičů v souřadnicích  $x, y$  s vyznačenými čarami konstantních teplot chromatičnosti (K)

souřadnicemi  $x, y$ ) uvažovaného světla, za předpokladu, že se vzdálenost sleduje v rovnoměrném obrazci chromatičnosti. Stanovení ekvivalentní  $T_c$  a náhradní teploty chromatičnosti  $T_n$  usnadňuje diagram na obr. 5.9, v němž jsou zakresleny čáry konstantních teplot chromatičnosti. Diagram byl sestaven s využitím transformací soustavy normál na křivku teplotních zářičů v rovnoměrném diagramu chromatičnosti.

#### 5.5. Jiné způsoby specifikace barev

Kolorimetrické soustavy popsané v odstavci 5.3 jsou pro reprodukce barev v praxi obtížně využitelné, neboť realizace světla nebo barevných vzorků podle jejich trichromatických souřadnic či složek je bez speciální techniky velmi obtížná. Proto byly v některých zemích vypracovány atlasy barev, což jsou obecné vzorníky barev natištěné na papírových nebo plastových podložkách.

Jedním z nejznámějších atlasů barev je Munsellův atlas, používaný ve světelné technice k určování kolority (barev) předmětů pozorovaných v denním světle. Barevné vzorky jsou v tomto prostorovém systému určeny třemi údaji: barevným tónem (*hue*), světlostí (*value*) a sytostí (*chroma*). Každý z uvedených parametrů má svou stupnici hodnot (obr. 5.10).

Stupnice barevných tónů obsahuje pět základních barev: červenou (R – red), žlutou (Y – yellow), zelenou (G – green), modrou (B – blue) a purpurovou (P – purple), a dále pět mezilehlých barev: žlutočervenou (YR), zelenožlutou (GY), modrozelenou (BG), purpurově modrou (PB) a červenopurpurovou (RP). Aby členění bylo podrobnější, je mezi dvojice zmíněných deseti barevných vzorků vloženo ještě dalších deset barevných odstínů odlišených číslicí od 0 do 10, která se v symbolu barvy umísťuje před písmeno označující název nejbližší základní nebo mezilehlé barvy (např. 4R nebo 7BG), přičemž číslice 5 označuje jednu ze základních nebo mezilehlých barev.

Světlost barvy, která je vlastně jasností barvy v rovnoměrné fyziologické stupnici, se vystihuje podle tab. 5.4 číslem v rozmezí od 0 do 10 (0 = černá, 10 = bílá) v závislosti na činiteli odrazu povrchu daného vzorku.

Sytost barvy se v tomto případě charakterizuje podle podílu bílé nepestré barvy v daném barevném jmenu a označuje se počtem barevných odstínů ležících mezi daným barevným vzorkem a příslušnou nepestrou barvou.

Stupnice jsou voleny tak, aby v podmínkách denního osvětlení bylo dosaženo rovnoměrných vzdáleností při subjektivním vnímání rozdílu barvy, změnili se světlost o jeden stupeň, sytost o dva



stupně a barevný tón o tři stupně. Z toho důvodu je počet stupňů sytosti rozdílný pro různé barevné tóny. Počet rozlišitelných barev mezi nepestrou bílou a sytou barvou při stejné jasnosti závisí na barevném tónu; např. je větší pro žlutou a červenou než pro modrou. Kromě toho je třeba vzít v úvahu, že se Munsellův sys-

tojit ke značnému zkreslení vjemu barev osvětlených předmětů. Problémy vznikají v rozlišování barev a zejména v přizpůsobení barvy vyráběného předmětu barvě standardu, a to jak v běžném životě, tak i v obchodě a průmyslové výrobě.

Vliv spektrálního složení světla zdroje na vjem barvy osvětlených předmětů cha-

smluvním zdrojem světla za stanovených podmínek pozorování. Metoda hodnocení je založena na číselném vyjádření rozdílu vjemu barvy vybraného souboru osmi, popř. až čtrnácti barevných vzorků (tab. 5.5) při postupném osvětlení uvažovaným a smluvním zdrojem. Výpočtem se stanovuje *všeobecný index podání barev*  $R_a$ . Pro podrobnější hodnocení se někdy stanovují pro každý barevný vzorek zvlášť *speciální index podání barev*  $R_1, R_2, R_3$  atd. Řada barevných vzorků se pro tento účel může rozšířit až na čtrnáct vzorků. Rozdíl vjemu barvy vzorku ve světle smluvního a zkušebního zdroje se odvozuje od porovnání vzdálenosti  $\Delta E_i$  bodů popisujících oba barevné vjemy ve starším rovnoměrném diagramu chromatičnosti ( $u, v$ ), popř. v rovnoměrném kolorimetrickém prostoru CIE 1960, popř. 1964 (UVW). Všeobecný index barevného podání  $R_a$  se určuje ze vztahu

$$R_a = 100 - 4,6 \overline{\Delta E}_a \quad (5.16)$$

Speciální index podání barev  $R_i$  vzorku  $i$  se počítá z rovnice

$$R_i = 100 - 4,6 \Delta E_i \quad (5.17)$$

V rovnicích (5.16) a (5.17) značí

$$\overline{\Delta E}_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta E_i \quad (5.18)$$

$$\Delta E_i = \sqrt{(U_{oi} - U_{ki})^2 + (V_{oi} - V_{ki})^2 + (W_{oi} - W_{ki})^2} \quad (5.19)$$

kde jsou

$U_{oi}, V_{oi}, W_{oi}$  trichromatické složky popisující v soustavě UVW barevný vjem  $i$ -tého vzorku ( $i = 1, 2, 3 \dots 8$ ) při osvětlení srovnávacím zdrojem,

$U_{ki}, V_{ki}, W_{ki}$  trichromatické složky popisující v soustavě UVW barevný vjem  $i$ -tého vzorku při osvětlení zkušebním zdrojem,

$n$  počet použitých barevných vzorků (obvykle osm nebo čtrnáct).

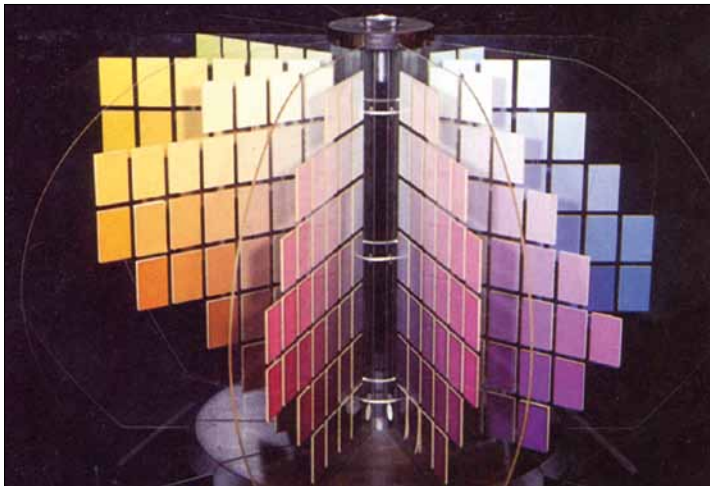
Pro práci s trichromatickými souřadnicemi lze s uvážením vlastností barevných vzorků rovnici (5.19) upravit do tvaru

$$\Delta E_i = 800 \times \sqrt{[(u_{oi} - u_o) - (u_{ki} - u_k)]^2 - [(v_{oi} - v_o) - (v_{ki} - v_k)]^2} \quad (5.20)$$

kde jsou

$u_o, v_o$  souřadnice bodu popisujícího chromatičnost světla srovnávacího zdroje v diagramu  $u, v$ ,

$u_k, v_k$  souřadnice bodu popisujícího chromatičnost světla zkušebního zdroje v diagramu  $u, v$ ,



Obr. 5.10. Munsellův atlas – jedno z možných uspořádání vzorníku barev pro určení odraznosti plochy

tém týká pouze barev (kolorit) povrchů, a proto počet stupňů ve škále sytosti závisí také na světlosti.

Soubor pečlivě standardizovaných vzorků barev zpravidla bývá uspořádán v podobě knihy barevných tabulek, kde každá tabulka má konstantní barevný tón. Jakákoliv barva je jednoznačně určena třemi parametry, uváděnými v pořadí barevný tón a světlost lomená sytostí (světlost/sytost). Například sytá rumělká se značí 5R 5/12, nesytá růžová (se stejným barevným tónem jako předchozí barva) má symbol 5R 8/4, černá N 1/0 a bílá N 9/0.

## 5.6. Podání barev

Vjem barvy určitého předmětu je v zásadě podmíněn jednak spektrálním složením záření zdroje osvětlujícího předmět, jednak spektrálním činitelem odrazu či prostupu pozorovaného předmětu. Vjem barvy je však ovlivněn i samotným zrakem, a to s ohledem na různou citlivost k jednotlivým barvám i s ohledem na stav adaptace zraku podle převládajícího druhu osvětlení zorného pole. Vzhledem k dlouholetému zvyku člověka na barevný vzhled předmětů v denním (přírodním), ale také v žárovkovém světle se tato okolnost často stává i vžitou představou a vjem barvy předmětu v přírodním, resp. žárovkovém světle se běžně považuje za normální. Proto při pozorování předmětů ve světle výbojových zdrojů (s velmi odlišným spektrálním složením v porovnání s teplotními zdroji) může

rakterizuje *podání barev*. Vjem barvy se přitom vědomě či nevědomě srovnává s jejích vzhledem ve světle smluvního či obvyklého zdroje světla. Při takto pojatém hodnocení barev se v souladu s doporučením Mezinárodní komise pro osvětlování neuvažují ani estetické, ani psychologické vlivy. K číselnému ocenění jakosti podání barev se využívá *index podání barev*, který vyjadřuje stupeň shodnosti vjemu barvy předmětů osvětlených uvažovaným zdrojem a barvy týchž předmětů osvětlených

Tab. 5.4. Veličiny pro určení světlosti barvy

Stupeň světlosti barvy podle Munsella	Činitel odrazu povrchu <sup>*)</sup> (%)
10,0	100,0
9,5	87,8
9,0	76,7
8,5	66,7
8,0	57,6
7,5	49,4
7,0	42,0
6,5	35,3
6,0	29,3
5,5	24,0
5,0	19,3
4,5	15,2
4,0	11,7
3,5	8,8
3,0	6,4
2,5	4,5
2,0	3,0
1,5	2,0
1,0	1,2
0,0	0,0

<sup>\*)</sup> předpokládá se dokonale rozptýlně odrážející povrch

$u_{oi}, v_{oi}$  souřadnice bodu popisujícího v diagramu  $u, v$  barevný vjem  $i$ -tého zkušební vzorku ( $i = 1, 2$  až 8) osvětleného srovnávacím zdrojem,

$u_{ki}, v_{ki}$  souřadnice bodu popisujícího v diagramu  $u, v$  barevný vjem  $i$ -tého vzorku osvětleného zkoušeným zdrojem.

Dosavadní metoda hodnocení podání barev indexem  $R_a$  je založena na předpokladu, že teplota chromatičnosti světla srovnávacího a zkoušeného zdroje se liší nejvýše o  $5 \text{ MK}^{-1}$ . To např. odpovídá při teplotě  $3\,000 \text{ K}$  rozdílu asi  $50 \text{ K}$ , ale při  $7\,400 \text{ K}$  již rozdílu  $250 \text{ K}$ . Při náhradní teplotě chromatičnosti do  $5\,000 \text{ K}$  se jako srovnávací zdroj používá černý zářič, tedy teplotní zdroj. Pro zdroje s náhradní teplotou chromatičnosti nad  $5\,000 \text{ K}$  se za srovnávací zdroj využívá zdroj se spektrálním složením odpovídajícím smluvnímu bílému světlu D a některé fázi přírodního světla.

Hodnota indexu podání barev  $R_a$  může být v rozmezí od 0 do 100. Ve světelných zdrojích a v přírodním (denním) světle se barvy předmětů vnímají nejvěrněji, čemuž odpovídá  $R_a = 100$ . Naopak v monochromatickém žlutém světle nízkotlakých sodíkových výbojek se barvy nerozlišují vůbec, a tedy  $R_a = 0$ . V současnosti se ve většině interiérů požaduje  $R_a > 80$ , a to i ve většině pracovních prostorů (podle ČSN EN 12464).

### 5.7. Normalizované druhy světél

Při hodnocení chromatičnosti světla zdrojů a kolority předmětů se využívají různá nepestrá světla. Hodnotí-li se chromatičnost světla zdrojů, jako nepestré (bílé) smluvní světlo se uvažuje světlo s izoenergetickým spektrem (v obr. 5.6 vyznačeno bodem E se souřadnicemi  $x = 0,335$ ,  $y = 0,333$ ,  $u = 0,2105$ ,  $v = 0,4737$ ). Zkoumá-li se však kolorita předmětů, za nepestré světlo se považuje světlo zdroje, který předmět osvětluje. Aby byla zajištěna určitá jednotnost při hodnocení kolority, pracuje se pouze s několika bílými smluvními světly, a to podle [5.1] se světly A, B, C, D<sub>65</sub>, E, I. Normalizované světlo A odpovídá umělému žárovkovému osvětlení a realizuje se jako světlo plynem plněné žárovky s dvojité vnutitým wolframovým vláknem s teplotou chromatičnosti  $2\,856 \text{ K}$ ;  $350,14 \text{ MK}^{-1}$ . Normalizované světlo B odpovídá střednímu dennímu světlu s převažující složkou přímého slunečního záření ( $T_c = 4\,874 \text{ K}$ ;  $205,17 \text{ MK}^{-1}$ ). Normalizované světlo C odpovídá střednímu dennímu světlu bez přímého slunečního záření ( $T_c = 6\,774 \text{ K}$ ;  $147,62 \text{ MK}^{-1}$ ). Normalizované světlo E

Tab. 5.5. Barevné vzorky používané ke stanovení indexu podání barev (specifikace podle CIE)

Číslo barevného vzorku	Označení barvy podle Munsellova atlasu	Specifikace podle CIE			Orientační pojmenování podle barevného tónu	
		x	y	Y	česky	anglicky
1	7,5 R 6/4	0,375	0,331	29,9	světle šedočervený	light grayish red
2	5 Y 6/4	0,385	0,395	28,9	tmavě šedožlutý	dark grayish yellow
3	5 DY 6/8	0,373	0,464	30,4	sytě žlutozelený	strong yellow green
4	2,5G 6/6	0,287	0,4	29,2	středně žlutozelený	moderate yellowish green
5	10 GB 6/4	0,258	0,306	30,7	světle modrozelený	light bluish green
6	5 PB 6/8	0,241	0,243	29,7	světle modrý	light blue
7	2,5 P 6/8	0,284	0,241	29,5	světle fialový	light violet
8	8/6/2007 22:00	0,325	0,262	31,5	světle červenopurpurový	light reddish purple
9	4,5 R 4/13	0,567	0,306	11,4	sytě červený	strong red
10	5 Y 8/10	0,438	0,462	59,1	sytě žlutý	strong yellow
11	4,5 G 5/8	0,254	0,41	20	sytě zelený	strong green
12	3 PB 3/11	0,155	0,16	6,4	sytě modrý	strong blue
13	5YR 8/4	0,372	0,352	57,3	světle žltorůžová, barva pleti	light yellowish pink, caucasian complexion
14	5 GY 4/4	0,353	0,432	11,7	středně olivově zelený, listová zeleň	moderate olive green, leal green

odpovídá svou chromatičností izoenergetickému spektru, jehož zdroj je však fyzikálně realizovatelný. Normalizované světlo D svým spektrálním složením odpovídá průměrnému dennímu světlu. Přednostně se používá světlo D<sub>65</sub> s ekvivalentní teplotou chromatičnosti  $6504 \text{ K}$ ;  $153,75 \text{ MK}^{-1}$ . Spektrum normalizovaného světla I odpovídá izoenergetickému spektru se stejnou zářivou energií pro každou vlnovou délku. Relativní spektrální složení záření jednotlivých normalizovaných druhů světél je uvedeno v tabulkách v normě ČSN 01 1718 Měření barev.

### 5.8. Způsoby měření barev

Číselné údaje vystihující barevný podnět lze v podstatě získat třemi způsoby, a to měření:

- spektrofotometrickým,
- srovnávacími kolorimetry,
- fotometrujícími kolorimetry.

Spektrofotometrická měření se považují za základní, neboť při nich lze dosáhnout nejpresnějších výsledků. Proto se využívají i pro stanovení etalonů. Tato měření se provádějí s využitím monochromátorů, resp. spektrofotometrů s vestavěnými monochromátory. Těmito přístroji se získají spektrální charakteristiky barevného podnětu od sledovaných primárních či sekundárních zdrojů a z nich se buď výpočtem, nebo použitím integrátorů připojených ke spektrometrum stanovují odpovídající trichromatické složky, resp. souřadnice ve zvolené trichromatické soustavě.

U srovnávacích kolorimetrů se v jejich zorném poli porovnává měřený barevný podnět s obvykle třemi měrnými podně-

ty přístroje. Změnou měrných podnětů přístroje se vždy zorné pole vyrovná tak, aby se barva srovnávacích částí zorného pole shodovala. Ze zjištěných údajů ovládacích prvků přístroje se pak stanovují hledané trichromatické souřadnice. Některé přístroje bývají přímo kalibrovány v trichromatických složkách. Tato měření jsou pohodlnější, rychlejší, ale méně přesná než spektrofotometrická měření, ale pro množství potřeb praxe plně vyhovují.

Fotometrujícím kolorimetrem se přímo stanovuje velikost trichromatických složek, resp. souřadnic. Fotometrické hlavy těchto kolorimetrů jsou vybaveny třemi receptory, jejichž spektrální citlivost je upravena tak, že se přímo měří veličiny úměrné trichromatickým složkám barevného podnětu. Měření fotometrujícími kolorimetry je nejrychlejší, nejpohodlnější a nejjednodušší. Přesnost a správnost naměřených hodnot jsou však velmi závislé na použitém principu a kvalitě zhotovení čidel i vyhodnocovacího zařízení. Přístroje je nutné pečlivě a pravidelně ověřovat.

#### Literatura:

- [5.1] ČSN 011718 *Měření barev*, 1992.
- [5.2] AGOSTON, G. A.: *Color Theory and its application in art and design*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer verlag, 2006
- [5.3] KRIVOŠEJEV, M. I. – KUSTAREV, A. K.: *Cvetovyje izmerenia. Energoatomizdat*, Moskva 1990.

Recenze: doc. Ing. Josef Linda, CSc., FEL, Západočeská univerzita v Plzni